

Capsule no. 15, mars 2013

## Les statistiques au service des géologues<sup>a</sup>

Bastien Fresia<sup>b</sup>

### Un premier constat

Le secteur minier du Québec est en croissance depuis plusieurs années engendrant des retombées économiques et sociales dans plusieurs régions de la province. En 2011, près de 300 sociétés minières effectuaient des travaux d'exploration au Québec, pour l'or principalement, mais aussi pour d'autres métaux et matières de plus en plus diversifiés (zinc, cuivre, fer, terres rares, uranium, graphite, etc.), afin de répondre aux demandes de l'industrie des hautes technologies.

Le forage au diamant est l'activité principale d'exploration et de définition (c'est-à-dire la caractérisation et le suivi de la taille et de la richesse d'un gisement) menant à la découverte et à l'exploitation de gisements miniers. Il s'agit de l'unique technique disponible permettant d'obtenir des informations directes (dont visuelles) en profondeur, mais le forage au diamant coûte cher accaparant une grande part des coûts liés à

l'exploration minérale. Or, les carottes de forages obtenues à grands frais sont sous-utilisées! Elles sont en général uniquement décrites visuellement par les géologues et seulement certaines parties sont analysées pour la lithogéochimie (géochimie des lithologies permettant de définir la nature des roches) ainsi que pour les teneurs en métaux d'intérêt économique. Des kilomètres de carottes de forage sont produits chaque année sans que celles-ci soient utilisées à leur juste valeur (figure 1). Il est connu que le fait de mesurer les propriétés physico-chimiques et minéralogiques sur les parties de la carotte non étudiées au départ permet d'améliorer les modèles géologiques et géophysiques menant vers une meilleure compréhension des environnements géologiques liés aux gisements métallifères et potentiellement à de nouvelles cibles d'exploration. Cependant, l'acquisition de tels paramètres nécessite de longues et coûteuses analyses qu'il n'est pas possible d'envisager à grande échelle dans une campagne d'exploration.



**Figure 1** : L'entrepôt de carottes de l'ancienne mine Mattagami Lake (Matagami, Baie-James).

<sup>a</sup> Cette capsule est disponible en ligne à l'adresse suivante : [www.ete.inrs.ca/ete/publications#CapsulesINRSsciences](http://www.ete.inrs.ca/ete/publications#CapsulesINRSsciences)

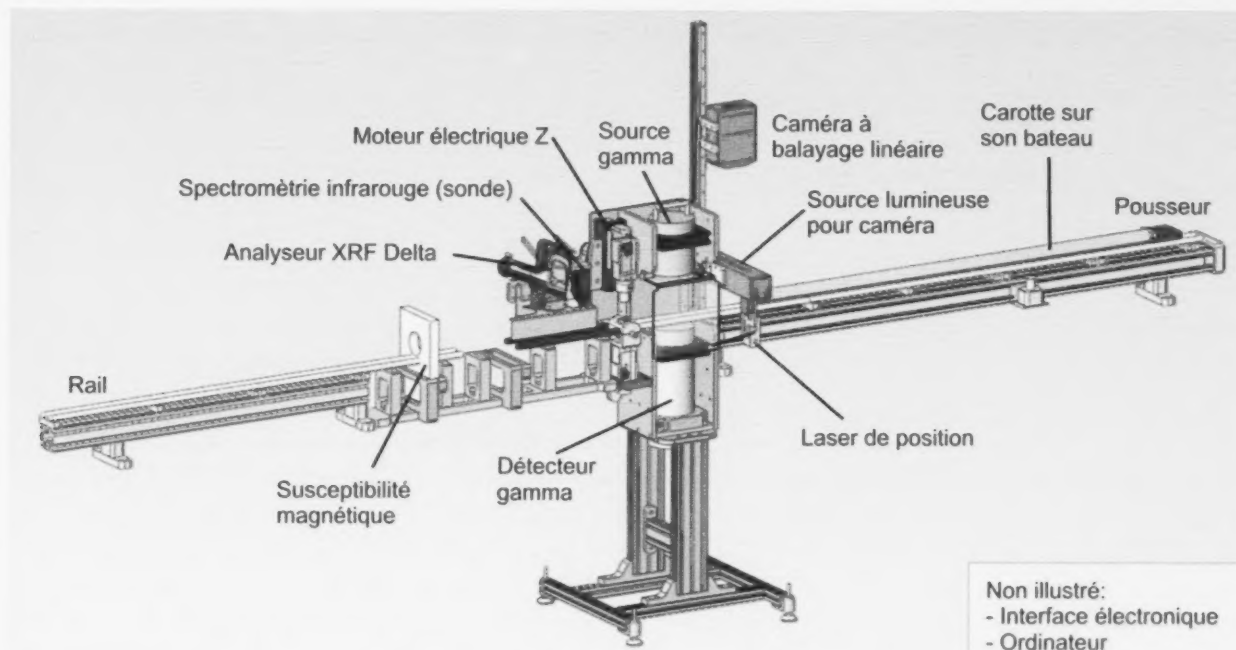
<sup>b</sup> Étudiant à la maîtrise au centre Eau Terre Environnement de l'INRS sous la direction du professeur Pierre-Simon Ross et la codirection du professeur Erwan Gloaguen. Contact : [bastien.fresia@ete.inrs.ca](mailto:bastien.fresia@ete.inrs.ca)

Pour pallier cette difficulté, le centre Eau Terre Environnement de l'INRS a mis sur pied en 2010 le Laboratoire Mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des ROches (LAMROC). Ce laboratoire a été conçu dans le but d'analyser quasi simultanément les propriétés physico-chimiques et minéralogiques des roches, de façon non destructive, directement sur le site d'entreposage des carottes. Le système d'acquisition est installé dans une remorque (photo ci-contre) permettant de le déplacer facilement.



Comme le montre la figure 2 ci-dessous, le système se compose d'un capteur de susceptibilité magnétique (capacité d'un objet à réagir à un champ magnétique), d'un analyseur géochimique par fluorescence à rayons X (FRX, en anglais dans la figure: XRF), d'un spectromètre infrarouge (pour analyser la minéralogie) et d'un système de rayonnement gamma permettant l'estimation de la densité des roches par atténuation

des rayons gamma. Enfin, une caméra à balayage linéaire enregistre une image continue de la carotte permettant d'observer les forages *a posteriori*. L'ensemble des capteurs est contrôlé par ordinateur afin d'effectuer toutes les mesures aux mêmes points sur la carotte de forage et ainsi d'en assurer la cohérence spatiale.



**Figure 2 :** Schéma du système d'acquisition du LAMROC.

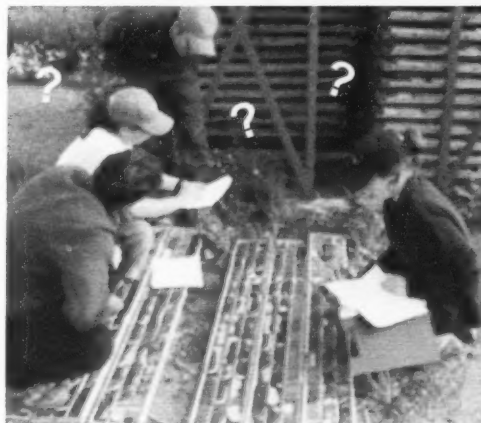
## La problématique de la pluridimensionalité des données

Le camp minier de Matagami, situé au nord de la sous-province géologique de l'Abitibi, regroupe de nombreux gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) riches en zinc. Les SMV sont des gisements polymétalliques associés à des roches volcaniques d'origine sous-marine. Particulièrement exploités pour le cuivre, le zinc, le plomb, l'argent et l'or, ils représentent également une source potentielle de plusieurs autres métaux pouvant contribuer à la rentabilité d'une exploitation soumise aux fluctuations des prix des métaux. Au Canada, on recense plus de 350 gisements de ce type représentant 49% de la production de zinc, 40% de l'argent, 27% du cuivre, 20% du plomb et 3% de l'or.

Dans la région de Matagami, peu d'informations sont disponibles sur les propriétés physiques et minéralogiques des roches hôtes dans lesquelles on retrouve les SMV. Ceci entrave, par exemple, les tentatives de modélisation géophysique. C'est pour cette raison que le ministère des Ressources naturelles du Québec a mandaté l'INRS pour effectuer une analyse multiparamétrique à haute résolution d'un grand nombre de carottes de forage à l'aide du LAMROC. Plus de 25 000 mesures de densité gamma, de susceptibilité magnétique, et de spectrométrie infrarouge et visible (minéralogie), ainsi que plus de 12 000 mesures de géochimie par FRX, réparties sur plus de 7 000 m de carottes de forage, ont été obtenues (1 point de mesure tous les 30 cm environ).

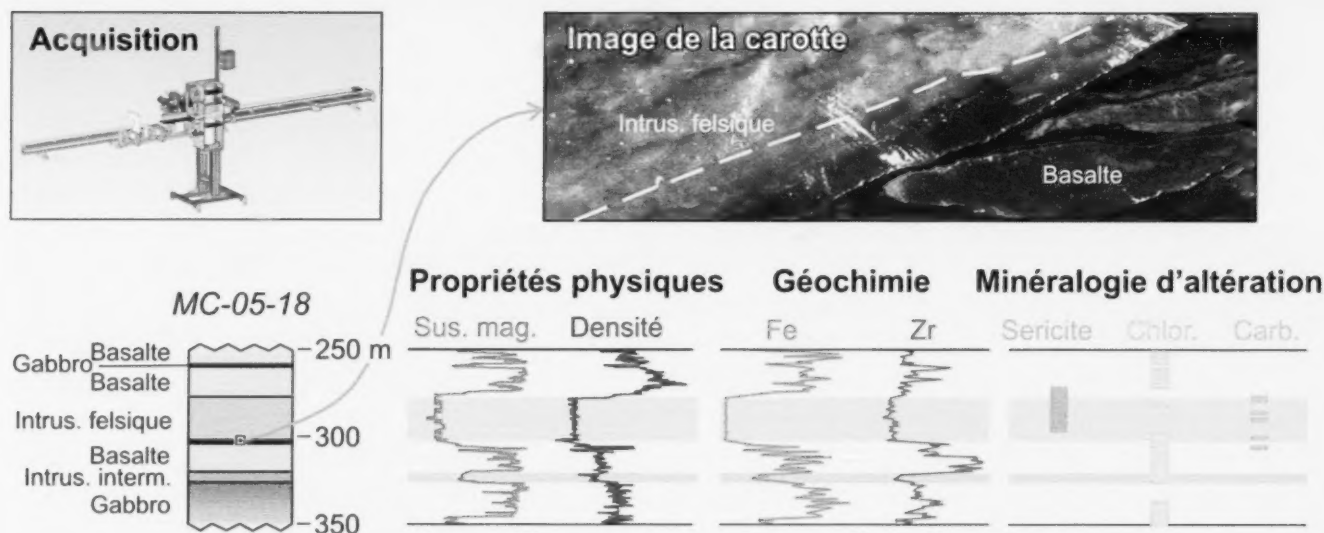
Mais la grande quantité de mesures physico-chimiques complique leur interprétation. Comment utiliser ce volume important de données afin d'aider les géologues dans leurs descriptions et interprétations géologiques, en particulier dans les secteurs d'altération difficiles à décrire visuellement? En effet, dans les secteurs où les roches ont été altérées par des réactions chimiques

causées par le passage d'un fluide hydrothermal (solution de gaz et de liquide de température élevée), les textures et les minéralogies originales sont masquées et donc difficiles à interpréter.



## Un « pseudo-log » statistique

Les méthodes d'analyses statistiques multivariées ont beaucoup évolué ces dernières décennies, notamment grâce aux progrès de l'informatique. Elles permettent aujourd'hui de traiter en même temps de grands volumes de données de façon automatisée. De la même façon que la litho-géochimie permet au géologue de confirmer ses hypothèses sur la nature des roches observées, l'utilisation de statistiques pour regrouper les points de données en fonction de leurs propriétés physico-chimiques (et donc des lithologies traversées par le forage) devrait permettre de créer un « pseudo-log » qui pourra guider le géologue dans sa description des roches altérées, difficiles à discerner les unes des autres. On appelle « log », la description géologique des roches d'un forage réalisée par un géologue. Graphiquement, un log peut être représenté par des barres de couleurs différentes selon les lithologies et leurs épaisseurs dans le forage (figure 3, page suivante). Ainsi, un « pseudo-log » est un analogue de cette interprétation obtenu statistiquement.



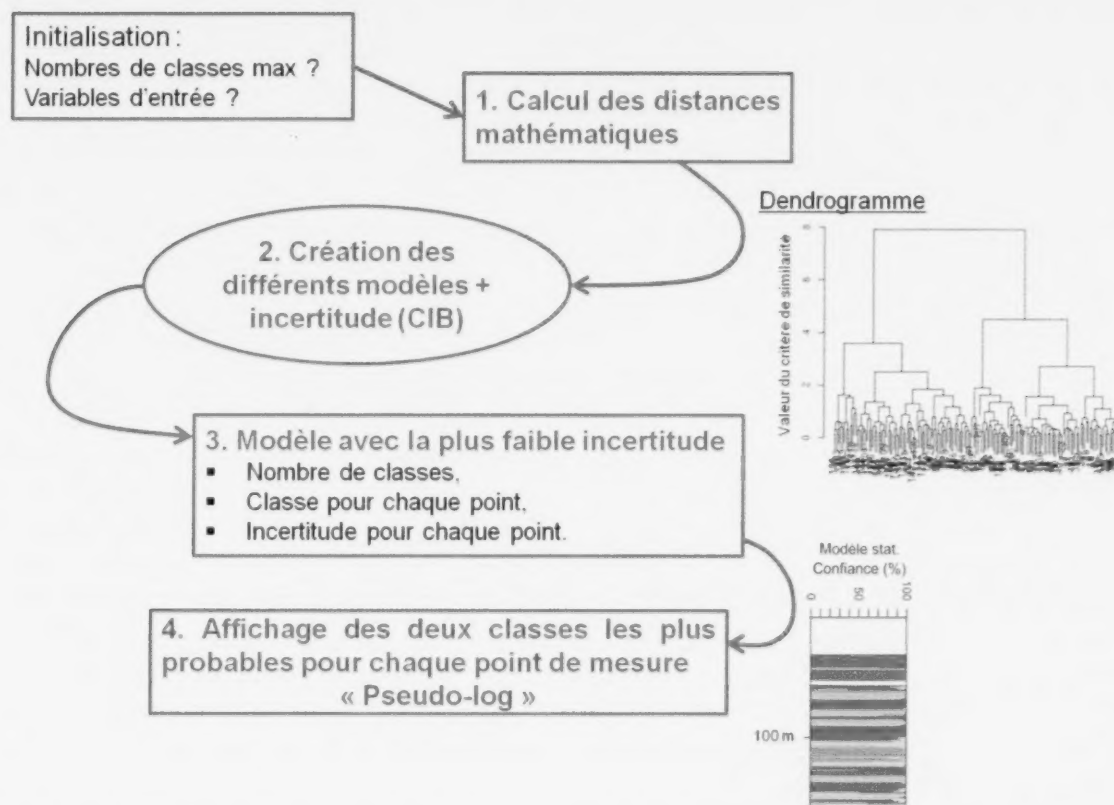
**Figure 3 :** Résultats obtenus grâce au LAMROC incluant une image de la carotte, une représentation des lithologies et des graphiques des propriétés physiques, géochimiques et minéralogiques des roches.

La méthode que nous avons retenue est l'analyse par regroupement de données (*cluster analysis*). Cette méthode statistique permet de regrouper les points de données selon un critère de similarité (ou de les séparer selon un critère de divergence) calculé à partir des variables décrivant chaque point de mesure. L'algorithme utilisé est basé sur l'estimation statistique de différents modèles de distribution du classement des points de mesure et le choix du modèle décrivant le mieux la structure (distribution statistique) des données (figure 4, page suivante). Chaque point de mesure est ainsi assigné à une classe qui définit son groupement dans l'ensemble de points. Le calcul dépend fortement des variables d'entrée définies par l'utilisateur. Puisqu'on cherche à identifier les lithologies, les variables géochimiques telles la silice ou le fer, fortement mobilisées durant l'altération hydrothermale, sont à exclure alors que les ratios d'éléments chimiques « immobiles » (résistants à l'altération), tels le titane, le zirconium et l'aluminium, sont de bons outils descriptifs.

Un dendrogramme, c'est-à-dire un diagramme décrivant les distances mathématiques (critère

de similarité) entre tous les points de mesure, est d'abord calculé. À partir de cette première estimation du nombre de classes et de la distribution statistique des variables à l'intérieur de chacune d'elles, l'algorithme calcule différents modèles en tentant de maximiser la probabilité de chaque point d'appartenir à une classe en particulier; en réestimant à chaque itération la distribution statistique des classes à l'intérieur de l'ensemble de données. Un critère d'incertitude (CIB pour Critère d'Information Bayésien) est attribué à chacun de ces modèles permettant de déterminer lequel est le plus vraisemblable selon la distribution des données. Ce modèle indique les regroupements lithologiques les plus probables statistiquement pour l'ensemble de données selon les variables d'entrée utilisées. La représentation des deux classes les plus probables pour chaque point de donnée permet de visualiser la répartition des groupements le long du forage par des barres horizontales de couleur dont la longueur est fonction de la probabilité de chaque point d'appartenir à la classe définie par l'algorithme (figure 4). Le fait de présenter deux classes au lieu d'une seule permet de mettre en évidence les points pour lesquels le choix demeure incertain.





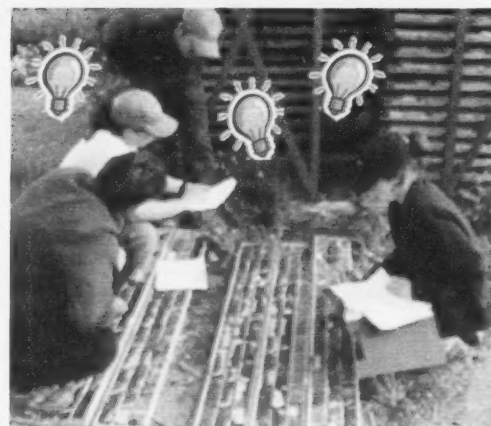
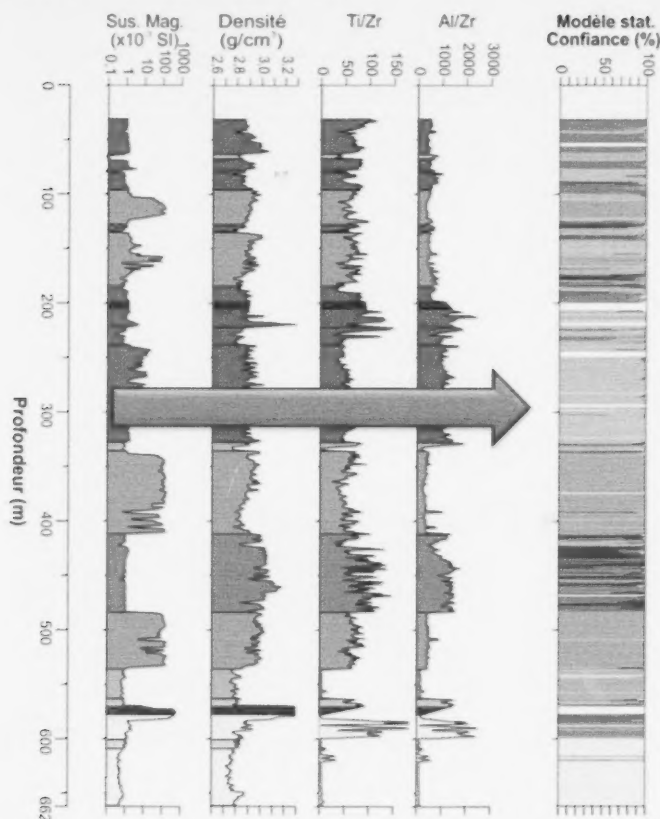
**Figure 4 :** Organigramme de la méthode de discrimination lithologique par regroupement de données basé sur des modèles.

## Un outil pour la description géologique

Le modèle statistique obtenu s'ajoute à la description visuelle faite par le géologue et lui permet de conforter ses idées dans les secteurs difficiles à décrire visuellement, d'identifier des éléments plus fins et de se concentrer sur les secteurs d'intérêt. Un exemple de résultats que nous avons obtenus à partir de carottes de forage de Mattagami Lake est présenté à la figure 5 (page suivante).

L'approche utilisée met à profit les données recueillies grâce au LAMROC pour décrire dans l'espace et à haute résolution, les lithologies liées à la mise en place de gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) pour l'ensemble des carottes de forage étudiées.

En conclusion, cette approche est particulièrement intéressante, car elle permet de dégrossir l'information de grandes campagnes de forage, de cibler avec plus de précision les secteurs d'intérêt pour la prospection et donc, de mieux valoriser les coûteux forages au diamant de l'industrie minière. Ces modèles statistiques apportent une aide importante pour la modélisation géologique et géophysique des environnements des gisements métallifères. L'approche peut également être appliquée à d'autres domaines de recherche (environnement, génie, etc.) nécessitant une caractérisation précise du sous-sol.



**Figure 5 :** Exemple d'un modèle statistique obtenu pour le forage BRC-08-72 de Matagami à partir de 1 105 points de mesure répartis sur les 662 m du forage. Les couleurs correspondent aux différentes lithologies; en jaune, violet et rouge : trois rhyolites (roches volcaniques felsiques riches en silice); en vert : des laves mafiques (riches en éléments ferromagnésiens) à intermédiaires (entre felsique et mafique); en brun et marron : des roches intrusives mafiques à intermédiaires. À gauche, les variables ayant servi à la création du modèle et décrivant les lithologies : magnétisme, densité et ratios d'éléments géochimiques (Ti/Zr et Al/Zr) communément utilisés pour caractériser les roches volcaniques.

## Pour en savoir plus...

### Les provinces géologiques du Québec :

[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/geologie/geologie-province\\_geologique.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/geologie/geologie-province_geologique.pdf)

### L'activité minière au Québec :

Carte : [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/publications/activite-miniére-quebec.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/publications/activite-miniére-quebec.pdf)

Rapport 2012 : [www.mrn.gouv.qc.ca/mines/publications/publications-rapports-2012.jsp](http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/publications/publications-rapports-2012.jsp)

### Les travaux du LAMROC :

Page Internet : [www.ete.inrs.ca/ete-recherche/infrastructures-equipements/laboratoire-mobile-caracterisation-physique-mineralogique-chimique-roches](http://www.ete.inrs.ca/ete-recherche/infrastructures-equipements/laboratoire-mobile-caracterisation-physique-mineralogique-chimique-roches)

### Article scientifique (en anglais) :

Ross, P.-S., Bourke, A. et Fresia, B. (2013). A multi-sensor logger for rock cores: Methodology and preliminary results from the Matagami mining camp, Canada. *Ore Geology Reviews*, en ligne.  
DOI : [10.1016/j.oregeorev.2013.01.002](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.002)